



EXPORTACION DE NUTRIENTES CALCULADA UTILIZANDO SIMULACIÓN MONTE CARLO¹

Ing. Agr. Beatriz Susana Pena de Ladaga

Universidad de Buenos Aires - Facultad de Agronomía – Departamento de Economía, desarrollo y planeamiento agrícola -
Cátedra de Administración Rural. spena@agro.uba.ar

Recibido: 08/11/2016

Aceptado: 11/06/2016

RESUMEN

El rendimiento de un cultivo agrícola es una variable aleatoria de producción que ejerce influencia fundamental en los resultados económicos; depende de las cambiantes condiciones meteorológicas (precipitaciones, temperaturas, irradiancia), además del tipo de suelo, cultivar adoptado, y técnicas de cultivo, entre otros. Esto hace que la exportación de nutrientes también sea aleatoria, por lo que el cálculo en base a valores medios para evaluar la necesidad de reposición de nutrientes cubriría la misma sólo acorde a esa información (el 50 % de los casos). En el presente trabajo se calculó el consumo de dos nutrientes convencionales: fósforo (P) y nitrógeno (N) para un cultivo de soja de primera en un establecimiento tipo del partido de Gral. Villegas. Se utilizó el método de simulación Monte Carlo que asocia valores de extracción a probabilidades. Se partió de series de rendimientos obtenidas con la tecnología actual generadas por el programa de simulación agronómica DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer versión 3.5). En el caso del N se consideró el aporte de la fijación biológica (FBN) como una variable aleatoria adicional. La exportación de nutrientes fue comparada con las dosis usuales de fertilizante aplicadas en el cultivo en la zona observándose una diferencia notoria respecto a la reposición necesaria para mantener el estado nutricional de los suelos en ambos nutrientes.

Palabras Clave: nivel de fertilizante a aplicar, simulación agronómica, simulación Monte Carlo.

NUTRIENT EXPORT CALCULATED USING MONTE CARLO¹ SIMULATION

SUMMARY

The yield is a random variable with incidence on economic results. It depends on the ever-changing meteorological conditions (rainfall, temperatures, irradiance), in addition to the soil type, adopted cultivar and technology. In consequence, nutrient exportation is a random variable. The software DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer version 3.5) was used to generate yield series according to the random climate conditions, under a defined soil and constant technology. Based in these numbers, the Phosphorus (P) and Nitrogen (N) exportations were calculated for a typical soybean crop (mid-october sowing) in a typical agricultural farm from General Villegas. It's taken into account the N and P intake for a TN of obtained grain; depending on the randomization of the yield variable, considering the amounts of biological fixation in the N (FBN) as another random variable. The nutrients exportation of P and N are calculated. The goal was to compare the exportation in a year with a fertilizer dose applied to see if that avoids the degradation of soil resource respect to their nutritional capacity. The reposicion was lower than we expected.

Key words: fertilizer level, agricultural simulation, Monte Carlo simulation.

¹ El presente trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto UBACyT 20020120200143BA

INTRODUCCIÓN

La realidad del negocio agropecuario de los años de buenos precios agrícolas, acompañados por el precio regulado de la carne, orientó los sistemas hacia un uso más intensivo de sus recursos productivos. Esta determinación contó con el apoyo del sólido sustento tecnológico de la siembra directa, derivando en una modificación de la asignación de superficie entre actividades. De este modo, el típico sistema productivo mixto (ganadero de carne-agrícola) que caracterizó a la zona en estudio por un largo período fue reemplazado por otras modalidades de uso del suelo, registrándose una proporción importante de monocultivo sojero. El proceso de desplazamiento de la frontera agrícola hacia zonas tradicionalmente ganaderas genera procesos de extracción de nutrientes que ponen en peligro la sustentabilidad de los sistemas productivos (Cruzate y Casas, 2009). El mercado no alerta sobre la degradación de los recursos, menos aún si se trabaja a corto plazo, como es el caso de los arrendatarios de tierra entre los cuales se destacan los *pooles* de siembra o fideicomisos difundidos en las últimas campañas (Bertolasi y Pena de Ladaga, 2008).

Los asesores agropecuarios suelen calcular las dosis de fertilizante a aplicar considerando los resultados de ensayos de respuesta en base a un rinde y un precio "medio". Es sabido que muy pocas veces se produce el "rinde y precio medio" dado que se trata de variables aleatorias. Para cubrir el riesgo de precios, suelen emplearse los mercados a término; para evitar pérdidas por malos rindes, se puede recurrir a seguros multirriesgo o de otro tipo. Pero podría decirse que se desestima el factor riesgo ambiental al no verificar la extracción que realiza el grano cosechado y compensarla adecuadamente (Harwood *et al.*, 1999; Pena de Ladaga y Berger, 2006). El método de Simulación Monte Carlo (SMC) se ha utilizado en numerosos estudios para obtener resultados económicos asociados a probabilidades, identificando punto de pérdida, de

cobertura de costos directos e indirectos, así como también medidas de variabilidad (desvío standard, coeficiente de variación, percentiles, etc.) pues al brindar una idea del riesgo involucrado facilitan la decisión del productor (Berger, 2006; 2008; Berger *et al.*, 2009, 2011, 2012, 2014; Pena de Ladaga *et al.*, 2011 a y b, 2012, 2014 a y b). En el presente análisis, el método es empleado para trabajar con valores físicos de exportación de nutrientes (P y N) en el cultivo de soja de primera, en un ambiente edáfico de características definidas, bajo un manejo tecnológico constante, considerando la variabilidad de factores climáticos (precipitaciones, temperaturas, vientos, irradiancia, fotoperíodo, etc.) que, a lo largo del ciclo del cultivo, afecta el desarrollo del mismo y, consecuentemente, la producción de grano. Como resultados se obtienen valores exportados de nutrientes asociados a distintos percentiles de probabilidad de rinde, pudiéndose confrontar los mismos con las dosis de fertilizante que se aplican verificando qué percentil de extracción se repone; también es factible identificar la dosis necesaria para compensar la extracción con un alto nivel de probabilidad (95 % por ejemplo). Para la confección del modelo se requiere el valor de la exportación de nutrientes por tonelada de grano de soja; el mismo presenta valores dispares en la bibliografía. Posiblemente, ello se deba al elevado y variable contenido proteico logrado a través de selección y/o modificaciones genéticas (Kantolic *et al.*, 2006). Según Cruzate y Casas (2009) el cultivo de soja produce una extracción de fósforo de 5,4 kg/tn de grano cosechado y, en el caso del nitrógeno (N), la cifra es de 48,50 kg/tn de grano. Andrade *et al.*, 1996; Alvarez y Steinbach, 2012 y Gutierrez Boern, 2012 (citados en Giuffré y Ratto, 2013), mencionan datos superiores: de 8 kg/tn en el caso del P y de 80 kg/tn de grano en el caso de N; en valores intermedios se encuentra la información que toma el programa Agro-Eco-Index (Viglizzo *et al.*, 2011). En el caso del N, el nutriente tiene la característica de poder ser fijado biológicamente (FBN)

al asociarse simbióticamente a bacterias del género *Rhizobium* y *Bradyrhizobium*, y formar nódulos capaces de fijar nitrógeno atmosférico con variada eficiencia (Kantolic *et al.*, 2006). La cantidad de nitrógeno fijado a partir de la atmósfera oscila en un amplio rango, entre 0 en cultivos no inoculados en suelos libres de *Bradyrhizobium*, hasta cerca del 90% en suelos con muy poco nitrógeno, como pueden ser los arenosos y con muy bajos niveles de materia orgánica. Los valores más comunes se encontraron alrededor de 175 kg N/ha.año para cultivos con rendimientos cercanos al máximo potencial y 100 kg N/ha.año para cultivos de rendimiento normal, representando un 50% del nitrógeno asimilado por el cultivo, aunque no es raro encontrar valores de FBN en un rango que represente un 30-80% del nitrógeno requerido por la planta (Uncovich y Pate, 2000). La textura, el contenido de materia orgánica de los suelos y su tasa de mineralización, así como la especie y subespecie de las bacterias inoculadas, afectan la importancia relativa de la FBN. Inclusive al ser numerosos los nutrientes que intervienen en el proceso de fijación (Purcell, 1999) ellos también constituyen fuente de las variaciones. Para la región pampeana, se estima que en suelos Argiúdoles del SE de la provincia de Buenos Aires sólo alrededor del 30% del nitrógeno acumulado proviene de la FBN (González, 2000). Los resultados físicos de exportación logrados mediante la herramienta de Simulación Monte Carlo podrían ser un inicio metodológico para realizar los análisis de impacto ambiental que mencionan Giuffré y Ratto (2013) siendo factible la incorporación de cláusulas en los contratos de arrendamiento para evitar la pérdida de la capacidad nutricional de los suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio de cultivo y sus características

El análisis se efectúa en base a los rendimientos correspondientes a establecimientos situados en el Partido de General Villegas, en

el noroeste de la provincia de Buenos Aires. Los suelos están compuestos por depósitos eólicos arenosos que conforman un perfil permeable y fértil, exceptuando ciertas zonas en las que existen lagunas. Han evolucionado sobre material loésico de edad cordobesa, del orden de los Haplúdoles y algunos Haplústoles, constituyendo potencialmente los suelos más productivos del Oeste bonaerense. Las condiciones climáticas de la zona son semi-áridas a sub-húmedas, y templadas a frías con temperaturas promedio anuales que rondan los 16 a 17°C. La distribución de precipitaciones en la región es de régimen primavera-estivo-otoñal con un nivel promedio histórico de 750 mm anuales. Estos registros se han visto incrementados en forma importante desde hace aproximadamente 30 años, con mediciones superiores a los 950 mm anuales. La soja modelizada fue de variedad DM 4670, con fecha de siembra del 15/10 al 15/11 y una densidad de siembra de 400.000 semillas/ha de variedades 100% Roundup Ready, genéticamente modificadas para tolerar aplicaciones de glifosato. El planteo técnico es el indicado por la revista *Márgenes Agropecuarios* (2015), corroborado por expertos de la zona (Domonte, 2015; Bertolasi, 2015).

MÉTODO DE ANÁLISIS

La simulación Monte Carlo es una herramienta muy utilizada para el análisis económico de situaciones de riesgo (Hazell y Norton, 1986; Taha, 1997; Harwood *et al.*, 1999; Winston, 2005; Hillier y Lieberman, 2006), ya que describe el comportamiento de una variable aleatoria dentro de un sistema que, a su vez, depende de otras variables aleatorias, generando un resultado también aleatorio (Berger y Pena de Ladaga, 2016). Adjudica un valor a cada variable aleatoria en cada iteración acorde a la distribución de probabilidad seleccionada (por el ajuste comprobado) a cada fenómeno estudiado. Crea así un escenario diferente cada vez, donde todas las variables aleatorias van tomando diferentes valores. Si el número de iteraciones es suficientemente elevado

(10.000 en este trabajo) se logra obtener una distribución de probabilidad para las variables de salida (exportación de nutrientes) que, acorde a la Ley de los grandes números, se distribuye como una variable normal (Vose, 2000 y 2008; Pena de Ladaga y Berger, 2006). Así se obtienen valores de media, desvío standard, coeficientes de variación y valores de percentiles asociados a cada valor de exportación. El complemento de Excel utilizado en el trabajo fue ModelRisk 5.3.0.0 (Vosesoftware, 2015).

Los datos del modelo

No es objetivo del trabajo discutir sobre la validez de las cifras de exportación según los autores; fue tomada la información de Cruzate y Casas, 2009 a los efectos de ejemplificar el planteo. Dado que los rendimientos se comportan como verdaderas variables aleatorias, pueden ser modelizados utilizando datos del pasado, suponiendo que las condiciones climáticas no cambiarán en el período estudiado respecto del período futuro en el que se aplicarán las predicciones (Boussard, 2015). Las series a utilizar deben estar originadas en la misma escala y tecnología para las que serán empleadas las conclusiones (Berger y Pena de Ladaga, 2015; 2016), en este caso se trata de establecimientos. Los datos que provienen de campos reales contienen series cortas e intermitentes (rindes de campañas alternas); el empalme de datos de distintos establecimientos no es recomendable a los fines del ajuste estadístico del Monte Carlo, por la diferencia de tecnología entre establecimientos (Berger y Pena de Ladaga, 2015). Por tal motivo, se generó una serie mediante simulación agronómica a través del programa DSSAT (Decision Support Systems for Agrotechnology Transfer 3.5) ajustada a las condiciones del análisis (Satorre y Mercau, 2002; Bert *et al.*, 2006, 2007 a y b;; Mercau *et al.*, 2007). Así se obtuvieron 33 rindes de soja de primera para la

Cuadro 1: Parámetros de distribución Pert de rinde en kg/ha.año.

Rinde	kg/ha.año
Minimo	2.100
Maximo	5.600
Mas Probable	3.943

zona y tecnología descriptas, correspondientes a las condiciones meteorológicas de las campañas 1970/71 a 2002/03, que abarca ciclos climáticos de fenómeno Niño y Niña, pero no presenta catástrofes (como la doble año “Niña” sucedida en la 2008/09). La variable aleatoria rinde fue trabajada como una variable de entrada de tipo Pert² cuyos parámetros figuran en el Cuadro 1 Este tipo de distribución (recomendada por Van Hauwermeiren, *et al.*, 2012) da mayor peso a los valores centrales que a las colas. Se trata de una distribución para variable continua subjetiva y, como sus límites son +/- infinito, se le aplicó un truncamiento de ambas colas mediante un *bound* de mínimo de 2.100 kg/ha.año y uno de máximo de 5.600 kg/ha.año, acorde a la opinión de expertos (Cultivar, 2015). Las cantidades de N de la FBN se restaron de los valores de extracción del grano, ya que se supone que el proceso ha devuelto al suelo esa cantidad. La FBN se trabajó como una variable aleatoria de entrada de naturaleza triangular con *bounds*; la misma funciona porcentualmente respecto al requerimiento total, siendo sus parámetros un mínimo de 30 %, uno valor más probable de 50 % y un máximo de 80 %; se tomó un *bound* izquierdo (mínimo absoluto) de 0 y un *bound* derecho (máximo) de 90 %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las 10.000 iteraciones generadas se calcularon el promedio, el desvío standard, el coeficiente de variación, se identificaron el

² Según los autores pueden cambiar las denominaciones; así el @risk la denomina betapert). Es el caso en que el valor más probable está determinado como igual a (mínimo + 4 *más probable + máximo)/6.

valor mínimo y máximo absoluto del total de los resultados, y también los percentiles. Adicionalmente se graficaron histogramas y curvas acumuladas de probabilidad para mejor visualización.

En la **Figura 1** puede observarse el histograma correspondiente al rendimiento aleatorio de las 10.000 iteraciones basadas en la información de la serie del modelo de simulación agronómica ajustada por expertos. En el **Cuadro II** se observan en la primer columna los resultados estadísticos referentes a rendimiento de soja de primera, y en las siguientes la exportación de N, la FBN y la exportación de P. Puede observarse que el rendimiento promedio es de 3.902,89 kg/ha.campaña, con un mínimo absoluto de 2.192,53 kg/ha y un máximo absoluto de 5.555,14 kg/ha, ambos por cada campaña. También pueden verse los distintos percentiles. El de 1 % corresponde a 2.492,63 kg/ha, lo que quiere decir que hay 100 de las 10.000 iteraciones cuyos rindes están comprendidos entre 2.192,53 y 2.492,63. El percentil de 99 % de 5.255,39 kg/ha, que significa que hay 100 de las 10.000 iteraciones

comprendidas entre los 5.255,39 y 5.555,14 kg/ha.

En relación al N que sale por grano, al restar lo que aporta la FBN, se observan valores medios de 88,90 kg/ha, mínimo absoluto de 27,40 kg y máximo absoluto de 173,66. El percentil de peores resultados (1%) requiere entre 27,40 y 39,42 kg de N por ha en una campaña. En la **Figura 2** de frecuencia acumulada ascendente de necesidad de reposición están marcados los percentiles de 5, 50 y 95 %. Para comprender la acción combinada de las variables aleatorias se agrega el histograma correspondiente a consumo y a FBN (**Figura 3**). Puede observarse claramente la diferencia en las formas funcionales resultado de las 10.000 simulaciones. Así, el coeficiente de asimetría del consumo fue de -0,061 y el de kurtosis de 2,344 mientras que para la FBN fueron de 0,43 y 2,83 respectivamente. Esta caracterización produce como resultado una curva de frecuencia acumulada ascendente de necesidad de reposición que no es una “copia” del consumo corrida sobre el eje de abscisas en forma paralela, sino el resultado aditivo

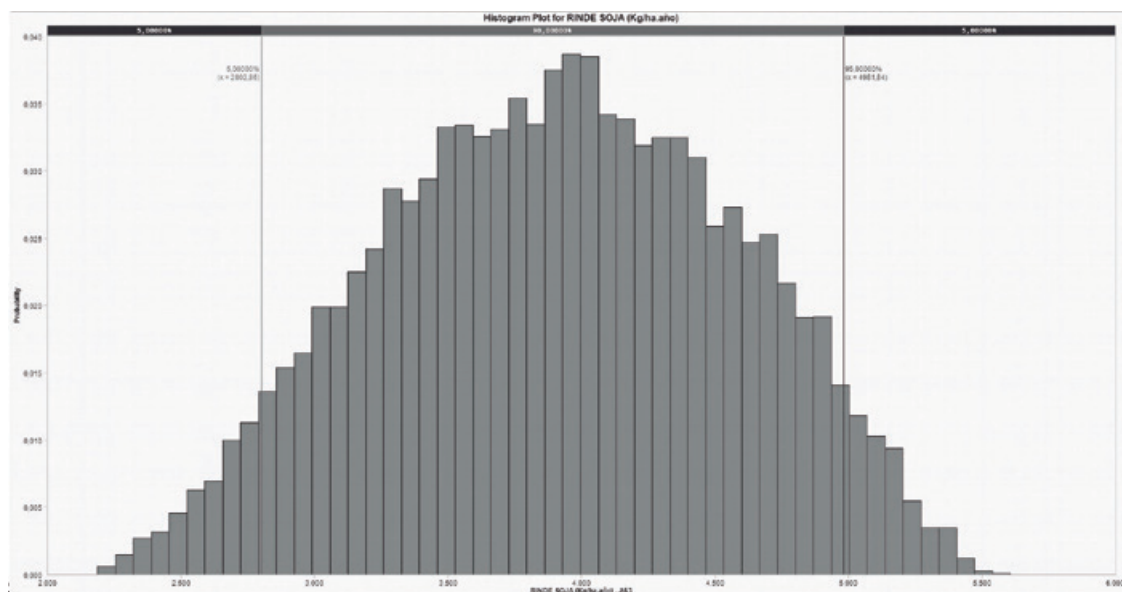


Figura 1: Histograma de rendimientos de soja construido con ModelRisk 5 (Vose Software, 2015)).

Cuadro II: Estadísticas de rendimiento de soja de primera, Exportación de N, FBN y exportación de P (expresados en kg/ha.campaña)

	RINDE	EXPORTACION NETA	FBN	EXPORTACION P
	SOJA	(CONSUMO – FBN)		
	kg/ha.año	kg/ha.año	kg/ha.año	kg/ha.año
Promedio	3.902,89	25,06	100,86	21,13
Mínimo	2.192,53	27,40	34,65	11,81
Máximo	5.555,14	173,66	195,26	29,92
Desvio STD	658,11	25,06	26,14	3,57
C.V.	16,86	28,19	25,91	16,92
Percentil 1 %	2.492,63	39,42	52,21	13,46
Percentil 5 %	2.802,86	50,12	61,89	15,14
Percentil 15 %	3.178,44	62,07	73,51	17,16
Percentil 25 %	3.427,03	70,09	81,42	18,50
Percentil 35 %	3.635,73	77,45	88,66	19,63
Percentil 45 %	3.831,53	84,47	95,16	20,69
Percentil 55 %	3.924,91	87,78	98,62	21,19
Percentil 65 %	4.201,60	97,96	108,96	22,69
Percentil 75 %	4.407,14	105,99	117,74	23,80
Percentil 85 %	4.653,69	116,19	129,06	25,13
Percentil 95 %	4.981,84	132,28	148,29	26,90
Percentil 99 %	5.255,39	149,17	167,78	28,38

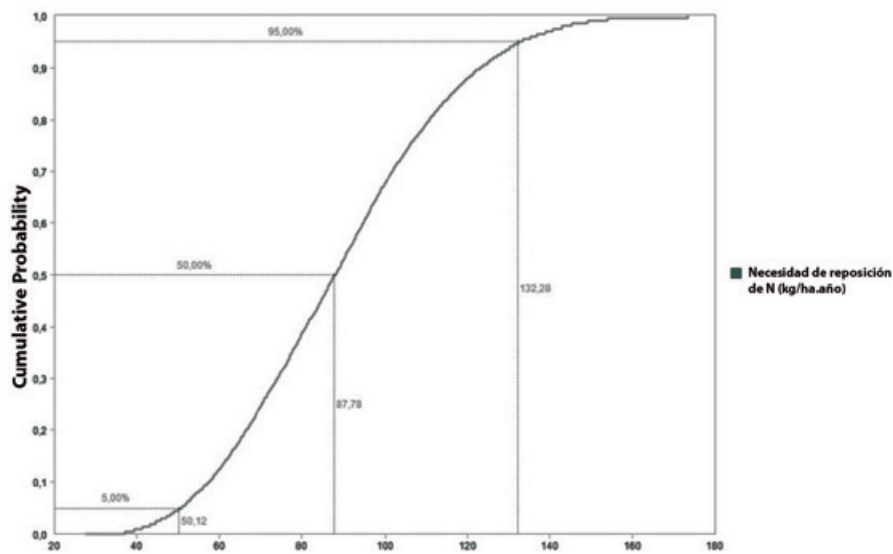


Figura 2: Probabilidad acumulada ascendente para Consumo de N - FBN (marcados percentiles 5, 50 y 95 %).

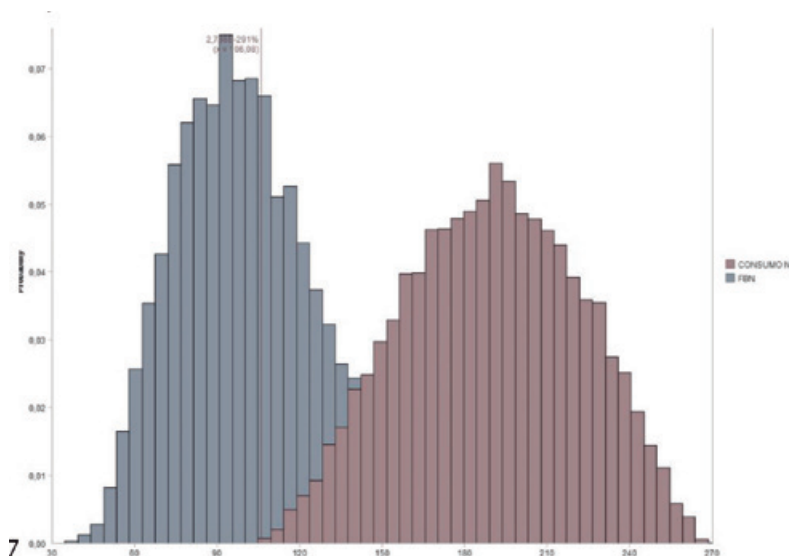


Figura 3: Histogramas de consumo de N y FBN

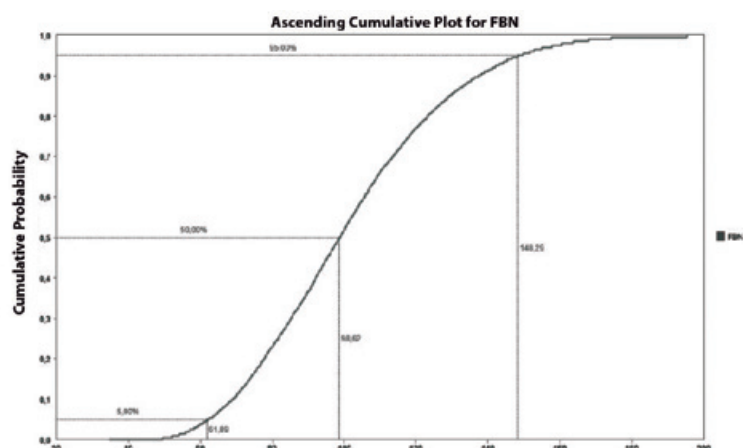


Figura 4: Probabilidad acumulada ascendente de variable FBN en kg de N fijado/ha.año (señalados percentiles 5, 50 y 95 %).

de la combinación entre rinde aleatorio (que da lugar a un consumo aleatorio) acompañado por una FBN también aleatoria.

La **Figura 4** corresponde a la distribución acumulada ascendente de la FBN que tiene un valor promedio de 100,86 kg/ha.año, con un mínimo absoluto de 34,65 kg/ha.año y un máximo de 195,26, es decir que se ve una importante variabilidad. El valor del percentil del 5 % se encuentra en los 61,89 kg/ha.año y el de 95 % en los 148,29. Respecto a la varia-

ble FBN, Ventimiglia y Torres Baudrix (2008) mencionan la importancia de comprobar el porcentaje de bacterias vitales en el proceso de inoculación dado que al tratarse de un producto “vivo”, la fecha de vencimiento es fundamental y las condiciones de almacenaje a que fue sometido el producto cruciales. En otras palabras, de nada sirve inocular adecuadamente con bacterias muertas, de allí las grandes variaciones porcentuales en la FBN que se mencionan. También Kantolic, *et al.*, 2006

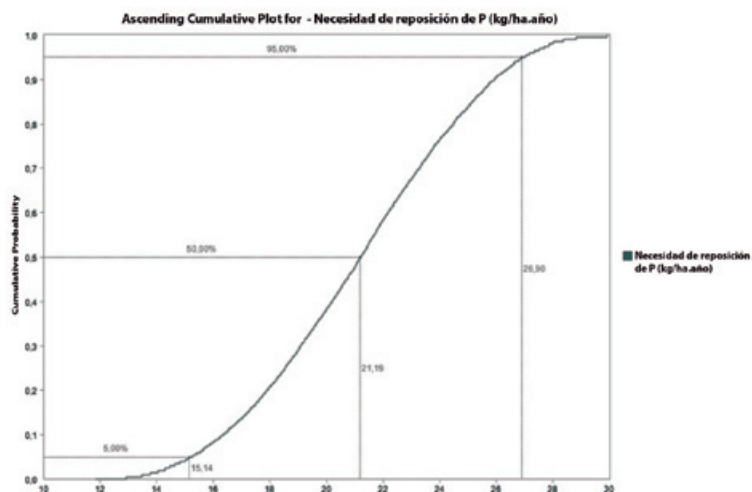


Figura 5: Probabilidad acumulada ascendente para Necesidad de reposición de P (marcados percentiles 5, 50 y 95 %).

hacen referencia a las prácticas relacionadas con la inoculación.

En las consultas zonales son pocos los casos que manifiestan fertilizar la soja de primera con N. Atribuyen la omisión de la práctica al efecto antagónico de la aplicación de N inorgánico con el proceso de FBN. Cierto es que en ensayos de fertilización nitrogenada se demuestra la sustitución del N fijado por el aportado por el fertilizante, sin un aumento neto en la asimilación del nutriente (Deibert *et al.*, 1979; Ghelfi *et al.*, 1984; Ferraris y González Anta, 2014). Esto significa que cantidad de N aplicado con el fertilizante y cantidad de N fijado estarían negativamente correlacionados. Quizás éste sea el factor que lleva a preferir una dosis baja de PMA (fosfato monoamónico), de alrededor de 40 kg/ha, para aportar P, de visible respuesta en el rinde. En el caso de la soja de segunda, ella utiliza el efecto residual de los 100 kg/ha de PDA (fosfato diamónico) que se acostumbra aplicar en el trigo que la antecede.

Respecto a la exportación de P (**Cuadro II** última columna), la media de extracción es de 21,13 kg/ha.año, el mínimo absoluto de 11,18 kg y el máximo absoluto de 29,92. El percentil de peores resultados (1%) exporta entre

15,14 y 11,18 kg de P por campaña. En este nutriente suele preferirse la aplicación de SPT (superfosfato triple) en dosis de 60 kg/ha.año, que apenas compensaría lo que el grano se lleva cuando el rinde corresponde al percentil del 1 %, es decir en campañas de muy malos rendimientos. En la **Figura 4** están marcados los percentiles de 5, 50 y 95 %. Para compensar la extracción media deberían superarse los 106 kg de SPT/ha.campaña y si se quisiera trabajar con los rindes del 95 % de probabilidad habría que fertilizar con 134 kg de SPT; en términos de precios relativos estaría significando que son necesarios entre 180 a 400 kg de grano/ha.campaña (oscilaciones acorde a variaciones relativas de precios entre los años 2013 y 2017); si se piensa en los valores de arrendamiento de 10-12 qq/ha (según calidad de suelo), la cantidad de grano sería equivalente a aumentos entre el 18 y 40 % en el arrendamiento. Podría pensarse que de haber existido alguna cláusula contractual en los arrendamientos la misma habría dado lugar a disminuciones en las rentabilidades que, posiblemente, hubiesen reducido el nivel al que llegó el monocultivo sojero.

Con los datos del **Cuadro II** queda en claro que no puede identificarse la probabilidad de

“neutralidad”, que era uno de los objetivos esperados del trabajo, pero sí la pérdida nutricional en “una campaña” para cada nivel de probabilidad. Si se considerara la reiteración del cultivo a lo largo de los períodos de los contratos, la situación de pérdida de capacidad nutricional, obviamente, se vería incrementada.

CONCLUSIONES

- El método de SMC puede ser utilizado para cuantificaciones físicas (además de las económicas tradicionales) como herramienta complementaria para conocer la probabilidad de restitución nutricional según la dosis de fertilizante aplicada, es decir, asociando a cada dosis un valor de probabilidad de rinde cuya extracción es compensada. Lo mencionado es válido para los nutrientes donde no existe otro modo de reponer la extracción más que la fertilización como es el caso del P, potasio (K), el boro (Bo) y el zinc (Zn). Eventualmente, podría ser una exigencia de estudios de impacto ambiental, incorporando en contratos de arrendamiento el valor inicial de nutriente, a fin de que el propietario de la tierra reciba el recurso en iguales condiciones en las que la ha entregado. Herramientas de este tipo podrían haber disminuido la excesiva difusión del cultivo de soja, evitándose situaciones de difícil reversión como aquellas que involucran actividades ganaderas, donde la inversión no se recupera de un año a otro (como sí se puede cambiar la elección entre cultivos agrícolas).
- En variables aleatorias que actúan en forma simultánea es importante considerar la interacción entre ellas. El muy simple modelo propuesto podría enriquecerse adicionando otras variables aleatorias en juego, tales como niveles iniciales de nutrientes, porcentuales de mineralización en función de las prácticas agronómicas, cuantificación de la correlación negativa entre N aplicado y FBN y tantos otros.
- El cálculo numérico indica que del N que sale por grano 100,86 kg son aportados por la FBN quedando un faltante medio de 88,9 kg/ha.año. Es decir que, estudiado en forma aleatoria, la FBN sería alrededor de un 60 %, cifra que coincide con los cálculos usuales. El importante efecto de la FBN sugiere que los asesores deberían hacer hincapié en la práctica de inoculación, verificación de productos a utilizar y técnica de aplicación, así como también en otras sencillas como la incorporación de rastros y rotaciones de cultivos que en los últimos años fueron dejadas a un lado por el inusual alto precio de la soja, que, con el paquete tecnológico asociado a las modificaciones transgénicas, produce resultados económicos atractivos y además estables, es decir de menor riesgo que la diversificación; ello convertía en racional la elección del monocultivo de soja.
- Respecto al P, la necesidad promedio de reposición de 21,13 kg indica que para cubrirlo serían necesarios 106 kg de SPT/ha. Considerando las dosis comunes entre los establecimientos y asesores consultados, se hace evidente que sólo en los años de peores condiciones climáticas con rindes mínimos, que se dan sólo en un 1 % de los casos, la fertilización estaría compensando la exportación por grano. Considerando la práctica actual en el caso del P sería aconsejable incrementar las dosis usuales, inclinándose hacia el SPT. El PDA, al contener N, sería causante de efecto inhibitorio de la FBN.
- Los valores de resultado son estrictamente dependientes de las cifras técnicas con que el modelo se construye, por lo que el presente estudio se considera sólo un ejemplo para visualizar la aleatoriedad de la magnitud de exportación de nutrientes que pueden tener lugar con alta probabilidad, y que resultó superior a los que surgen del análisis con valores medios. Las diferencias de datos entre fuentes conducen a conclusiones distintas; teniendo en

cuenta que la fuente utilizada para los cálculos fue la menor de las mencionadas, el empobrecimiento de los suelos sería como mínimo de las cifras citadas. Ello puede constituir una explicación de las conclusiones controversiales respecto a dosis necesaria para mantener el estado nutricional de los suelos.

- Los resultados están referidos a una única campaña; en caso de contratos de mayor

duración (usuales) donde se repite el cultivo de soja sobre el mismo potrero el déficit serían acumulativo profundizándose la falta de sustentabilidad del sistema.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su constante apoyo. Al revisor por sus sugerencias y al Ing. Lavado por su paciencia y buena voluntad.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, R. y Steinbach, H. (2012). Balance de carbono en agrosistemas. En Alvarez, G; Alvarez, C; Lavado, R. (eds.). Fertilidad de suelos, caracterización y manejo en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía - UBA. 203-216.
- Andrade, F., H. Echeverría, N. González, S. Uhart, y N. Darwich. (1996). requerimientos de Nitrógeno y Fósforo de los cultivos de Maíz, Girasol y Soja. Boletín técnico N° 134. INTA EEA Balcarce, 17 p.
- Berger, A. (2006). Evaluación de portafolios agrícolas con @Risk. Conferencia de las Américas de Palisade, 13 y 14 de noviembre de 2006, Miami. http://www.palisade.com/cases/ag_portfolios.asp.
- Berger, A. (2008). Análisis de portafolios agrícolas: un ejemplo integrando simulación Monte Carlo y modelos de simulación agronómica. III Taller Internacional "La modelización en el sector agropecuario", 12 de noviembre de 2008, Buenos Aires, Argentina.
- Berger, A.; Pena de Ladaga, S.; de Apellaniz, J. (2009). Programación lineal y simulación Monte Carlo combinadas para el planeamiento de una empresa agropecuaria mixta. Simposio de Investigación Operativa, de las 38 Jornadas de Informática e Investigación Operativa, Mar del Plata, agosto de 2009.
- Berger, A.; Pena de Ladaga, S.; Barriga, J. (2010). Conveniencia económica del empleo de seguros para riesgos climáticos en la producción agrícola: un análisis mediante simulación Monte Carlo. Revista de la Facultad de Agronomía, UBA, 30 (3): 157-168.
- Berger, A.; Pena de Ladaga, S.; Roselli, A. (2011). Riesgo meteorológico y de mercado: incidencia comparativa evaluada mediante simulación Monte Carlo. En IV Taller Internacional de Modelización económica en el sector agropecuario Vol IV. Capítulo 6: 101-118. Orientación Gráfica Editora. Buenos Aires.
- Berger, A.; Pena de Ladaga, S.; Monti, S. (2012). Simulación Monte Carlo para la toma de decisiones en sistemas agrícolas. XXIII Encuentro Nacional de Investigación Operativa. Facultad de Ingeniería UBA, Bs. As., mayo 2012.
- Berger, A.M.; Pena de Ladaga, S. (2014). Decisiones riesgosas en empresas agropecuarias. Simulación Monte Carlo como herramienta para el productor y el asesor. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 100 p.
- Berger, A.; Pena de Ladaga, B. S.; Monti, S. (2014). Riesgo en campos agrícolas de Pampa Ondulada Alta: Uso de estrategias de cobertura de precios y de diversificación para la disminución del riesgo. IV Congreso Regional de Economía Agraria y XLV Reunión Anual de la AAEEA, Buenos Aires, 23 de octubre 2014.
- Berger, A.; Pena de Ladaga, S. (2015). El análisis de riesgo como un rompecabezas: qué piezas usar y cómo ensamblarlas. Workshop organizado por la Asociación Argentina de Economía Agraria. Presentado en la XLVI Reunión Anual de la AAEEA, Tandil, 4 de noviembre 2015.
- Berger, A.; Pena de Ladaga, S. (2016). Decisiones riesgosas en empresas agropecuarias. La Simulación Monte Carlo como herramienta para el productor y el asesor. Editorial Orientación Gráfica Editora. 128 p.
- Bert, F.E.; Laciana, C.; Podestá, G.; Satorre, E.; Menéndez, A. (2007a). Sensitivity of CERES-Maize simulated yields to uncertainty in soil properties and daily solar radiation. Agricultural Systems 94:141-150.

- Bert, F.E., Podestá, G.P., Satorre E.H., Messina, C.D. (2007b). Usability of climate information on decisions related to soybean production systems of Argentinean Pampas. *Climate Research* 33, 123-143.
- Bert, F.E.; Satorre, E.H.; Ruiz Toranzo, F.; Podestá, G. (2006). Climatic Information and decision-making in maize crop production systems of the Argentinean Pampas. *Agricultural Systems* 88:180-204.
- Bertolasi, R. (2015). Presidente de Estancias Sta. María SCA. Comunicación personal.
- Bertolasi, R.; Pena de Ladaga, S. (2008). Tipologías organizacionales de la producción agropecuaria en Argentina. *Temas de Administración Rural*, julio 2008. Centro de Impresiones de la Facultad de Agronomía – U.B.A. 15 p.
- Boussard, J.M. (2015). El riesgo en las decisiones de la producción agropecuaria: aspectos microeconómicos. En *Notas sobre economía de la agricultura y las empresas agropecuarias y agroindustriales*. Editora: C. Vicién. Editorial Orientación Gráfica Editora. 15-56.
- Casas, R. (2000). La conservación de los suelos y la sustentabilidad de los sistemas agrícolas. Disertación acto de entrega de premio Antonio Prego. www.insuelos.org.ar.
- Cruzate, G.A.; Casas, R. (2009). Extracción de nutrientes en la agricultura argentina. Instituto de Suelos, CIRN, INTA. Publicado en *Informaciones agronómicas Del Cono Sur* # 44 p 21-26. IPNI.
- Deibert, E.J., M. Bijeriego, y R.A. Olson. (1979). Utilization of 15 N fertilizer by nodulating and non-nodulating soybean isolines. *Agron. J.* 71: 717-723.
- Domonte, M. (2015). Presidente de Fondomonte S.A. Comunicación personal.
- Ferraris, G.; González Anta, G. (2014). Contribución del Nitrógeno Inorgánico y de la FBN a la Nutrición nitrogenada de Soja en Argentina. INTA EEA Pergamino. Obtenido de www.agrositio.com.
- García, F. (1999). Soja: Criterios para la fertilización del cultivo. INPOFOS/PPI/PPIC Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Ghelfi, R.A., A. Bujan, M.C. Quitegui, y L.E.P. de Ghelfi. (1984). Determinación de N₂ atmosférico fijado por soja (*Glycine max* L.) mediante utilización de 15N en condiciones de campo. *Ciencia del Suelo* 2: 45-51.
- González, N. (2011). Biblioteca de fertilidad y fertilizantes en español. Seminario el potasio en la agricultura.
- Giuffré, L.; Ratto, S. (2013). *Agrosistemas. Impacto ambiental y sustentabilidad*. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 624 p.
- González, N. 1994. Dinámica de la fijación de nitrógeno en Soja, en suelos con alta fertilidad nitrogenada. Tesis MSc. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. <http://www.fertilizandocom/articulos/fijacion%20biologica%20del%20nitrogeno%20en%20soja.asp>
- González, N. (2000). Inoculación e inoculantes. *Fertilizar*, V (21): 18-21.
- Gutierrez Boem, F. (2012) Fertilización del cultivo de girasol en. En Alvarez, R.; Prystupa, P.; Rodríguez, M.; Alvarez, C. Fertilización de cultivos y pasturas, diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. 251-261.
- Harwood, J., R. Heifner, K. Coble, J. Perry and A. Somwaru. (1999). Managing risk in Farming: Concepts, Research and Analysis. *Agricultural Economic Report* 744. Economic Research Service, USDA. 125 p.
- Hazell, p; Norton, r. (1986). *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. Ed. Mac Millan Publishing co., New York. 399 p.
- Hillier F.; Lieberman G. (2006). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. Ed. Mc Graw - Hill Interamericana, S.A. 8ª ed. 998 p.
- Kantolic, A.; De la Fuente, E.; Giménez, P. (2006). Capítulo 2.2. Soja. P 97-141. En *Cultivos Industriales*. Elba De La Fuente *et al.*, 2006. 800 p.
- Márgenes Agropecuarios. Los números del campo. Revista mensual. Números de Octubre 2013 a marzo 2017.
- Mercau, J.L., J.L. Dardanelli, D.J. Collino, J.M. Andriani, A. Irigoyen & E.H. Satorre (2007). Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. *Field Crops Research* 100:200-209.
- ModelRisk Version 5, (2015). Vose Software.

- Pena de Ladaga, S; Berger, A. (2006). Toma de decisiones en el sector agropecuario. Herramientas de Investigación Operativa aplicadas al agro. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 308 p.
- Pena de Ladaga, S; Berger, A. (2016). Administración de la empresa Agropecuaria. Conceptos y criterios para el planeamiento. Capítulo 3. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires (segunda edición). 245 p.
- Pena de Ladaga, B.S.; Berger, A.; Domonte, M. (2011) a. El cultivo de soja y la disminución del riesgo de producción. Primera jornada temática: La investigación Científico – Técnica en soja. Buenos Aires, Facultad de Agronomía U.B.A. 1 y 2 de diciembre.
- Pena de Ladaga, S.; A. M. Berger; M. Domonte (2011) b. Monocultivo de soja versus diversificación: riesgo asociado a cada sistema. VIIA Jornadas interdisciplinarias de estudios agrarios y agroindustriales. Centro Interdisciplinario de Estudios Agrarios y Agroindustriales - UBA - Facultad de Ciencias Económicas. Bs. As., 1 al 4 de noviembre de 2011.
- Pena de Ladaga, B.S.; Berger, A.; Domonte, M. (2012). Diversificación intra y extrazonal en sistemas de producción agrícola. V Taller Internacional de Modelización Económica en el Sector Agropecuario. Buenos Aires, Bolsa de Cereales, 24 y 25 de octubre de 2012. Sesión 2: Modelos de ayuda a la decisión. En http://www.agro.uba.ar/sites/default/files/catedras/admin/pena_berger_domonte.pdf
- Pena de Ladaga, B. S.; Berger, A. (2014). Monocultivo de soja analizado con Simulación monte Carlo. 12º Simposio Argentino de Investigación Operativa, Buenos Aires, 2 de septiembre de 2014.
- Purcell, L. (1999). Physiology, nutrition and fertilization of soybeans in the United States. Anales Simposio "Monitoreo nutricional para la recomendación de fertilización de cultivos". POTAFOS. Piracicaba, SP, Brasil.
- Satorre, E.; Mercáu, J. (2002). Uso de modelos para la simulación del cultivo de girasol. En Díaz Zorita y Duarte (eds). Manual Práctico para el cultivo de girasol. Ed. Hemisferio Sur, Argentina. Pg 51-62.
- Taha, H.A. (1997). Investigación de operaciones. Una introducción. Ed. Prentice Hall. 6ta. edición. 916 p.
- Unkovich, M.J. y J.S. Pate. 2000. An appraisal of recent field measurements of symbiotic N₂ fixation by annual legumes. Field Crops Res. 65: 211-228.
- Van Hauwermeiren, M.; Vose, D.; Vanden Bossche, S. (2012). A Compendium of Distributions used in Modelrisk (second Edition) [ebook]. Vosesoftware, Ghent, Belgium. Accessed 15/12/15.
- Ventimiglia, L; Torrens Baudrix, L. 2008. Formas de inoculación y carga bacteriana. In. Experimentación en campo de productores. Resultados de experiencias campaña 2007 – 2008. pag. 166 – 169. INTA Estación Experimental Pergamino.
- Viglizzo, E; Frank, F.; Cabo, S. (2011) Agroecoindex – versión 2011.
- Vose, D. (2015).). <http://www.vosesoftware.com/content/ebookdistributions.pdf>
- Vose, D. (2000). Quantitative risk análisis: a guide to Monte Carlo simulation modelling. Chichester, UK, John Wiley and Sons. 418 p.
- Vose, D. (2008). Risk Analysis: a quantitative guide. Third Edition. Atrium, Southern Gate, Chichester, Ed. John Wiley and Sons., Ltd. 735 p.
- Winston, W. I. (2005). Investigación de operaciones. Aplicaciones y algoritmos. 4ta. Edición. Internacional Thompson Editores S.A. 1418 p.